二次侧水位对自然循环蒸汽发生器倒 U 型管内单相倒流影响的无量纲分析

沈梦思[1] 赵鹏程[1] 刘紫静[1] 李卫[1]
1（南华大学核科学技术学院 衡阳 421001）

摘要 核动力装置在自然循环条件下蒸汽发生器内会发生单相倒流，单相倒流对自然循环流动阻力和蒸汽发生器传热能力都产生了很大影响。为了从具有普适性的角度研究蒸汽发生器二次侧水位对单相倒流的影响，本研究建立了无量纲守恒方程。基于无量纲守恒方程，采用微扰理论获得了考虑二次侧水位的单相倒流临界点理论模型，在分析了二次侧水位对倒 U 型管压降的基础上，进一步分析了不同管长、无量纲阻力数、无量纲传热数条件下二次侧水位对临界点的影响。本文研究结果表明：二次侧水位降低导致倒流发生临界点逐渐接近原点；不同管长条件下二次侧水位影响规律相同；随着水位的降低，无量纲阻力数、无量纲传热数条件下对临界点的影响逐渐减小。本研究结论从理论上证明了二次侧水位对单相倒流的影响不利于倒流的发生，从机理层面解释了原因，可以辅助相关核动力装置的事故分析。

关键词 自然循环；蒸汽发生器；单相倒流；二次侧水位；无量纲分析
中图分类号 TL99
DOI:

Dimensionless analysis of the influence of secondary water level on the single-phase reverse flow in the inverted U-tube of steam generators with natural circulation

Mengsi Shen[1] Yanping Huang[2] Pengcheng Zhao[1] Lei Yu[3]
1(*Institution or University where the author works, District, Postal code, Country*)
2(*Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China*)

Abstract **[Background]**: The single-phase reversed flow in inverted U-tubes of steam generator (SG) leads to increasing flow resistance and decreasing heat transfer area, so it is meaningful to study this phenomenon. **[Purpose]**: The water level of the secondary side in SG can influence the single-phase reversed flow, it is necessary to clarify its influence mechanism from a more general viewpoint. **[Methods]**: The dimensionless conservation equations were derived first, and the extreme point was obtained based on the equations. Then the effect of the water level of the secondary side under conditions of different lengths, dimensionless resistance number, and dimensionless heat transfer number was analyzed. **[Results]**: The decrease in the water level leads to the critical point of the single-phase reversed flow gradually approaching the origin, the influence law of the water level is the same under different pipe length conditions. As the water level decreases, the influence of the dimensionless resistance number and dimensionless heat transfer number on the critical point gradually reduces. **[Conclusions]**: This study theoretically proves that the effect of secondary water level on single-phase reversed flow is not conducive to the occurrence of backflow, and explains the reasons from a mechanistic perspective, which can assist in accident analysis of related nuclear power plants.

Key words Natural circulation, Steam generator, Single-phase reversed flow, water level of the secondary side,

---

基金名称项目(批准文号) 资助
第一作者：沈梦思，男，1990 年出生，2023 年于上海交通大学获博士学位，研究领域反应堆热工水力
通讯作者：沈梦思，E-mail: shenmengsi1234@163.com
收稿日期：20XX-00-00，修回日期：20XX-00-00

Dimensionless analysis

自然循环蒸汽发生器倒 U 型管内出现的单相倒流现象的发生，一方面增大了核动力装置一回路自然循环流动阻力，另一方面减弱了蒸汽发生器换热能力，对核动力装置的安全产生危害。该现象从 1982 年 Loomis 等人首次发现后[1]，各国学者对其开展了许多理论、数值模拟和实验研究。虽然理论研究方法对蒸汽发生器倒 U 型管内的热工水力行为进行了一定的简化，但是能帮助从机理层面解释倒流发生原因及其影响因素，因此现有单相倒流机理研究通常以理论研究为基础。已有的理论研究从有量纲和无量纲守恒方程分析了单相倒流发生机理及其影响因素。Sanders 和 Watanabe 等均在回路和倒 U 型管守恒方程耦合基础上通过速度、温度和压力的小扰动分析法从系统稳定性角度分析了单相倒流发生原因[2][3]。章德等基于小扰动分析法和倒 U 型管内守恒方程分析了管长对单相倒流的影响[4]。郝建立等通过一系列研究建立无量纲守恒方程获得了倒 U 型管内单相倒流无量纲准则数组，在一般意义上分析了临界无量纲数的变化规律及影响因素[5-7]。沈梦思等建立了考虑二次侧水位的倒 U 型管内单相流动守恒方程，并建立了相应的倒流临界点理论模型[9]。李明芮等通过倒 U 型管内守恒方程分析了蒸汽发生器二次侧预热段对单相倒流的影响[9]。王一浒等基于倒 U 型管内守恒方程分析了管长与临界压降的关系，得到的结论与章德等一致[10]。上述绝大部分研究是在蒸汽发生器二次侧水位正常条件下开展，仅有的二次侧水位影响研究也是作者本人基于量纲守恒方程进行的分析，无法从一般意义上解释二次侧水位影响，因此有本研拟基于无量纲守恒方程分析二次侧水位对自然循环蒸汽发生器倒 U 型管内单相倒流的影响。

1 理论模型

1.1 无量纲守恒方程

图 1 为蒸汽发生器二次侧正常水位和异常水位示意图，为便于理论分析，认为倒 U 型管内单相流动是一维流动，管二次侧为饱和沸腾状态，且管外壁温等于二次侧饱和温度，管内流体流动中物性变化采用 Bousinessq 假设，认为仅有密度受温度影响，则倒 U 型管内单相流动质量、动量和能量守恒方程为：

$$\rho u=\rho_{\mathrm{r}}u_{\mathrm{r}} \tag{1}$$

$$\rho_{\mathrm{r}}l\frac{\partial u_{\mathrm{r}}}{\partial t}=\Delta p+\Delta\rho gH-\frac{\rho_{\mathrm{r}}u_{\mathrm{r}}^{2}}{2}\left(\frac{fl}{d_i}+k\right) \tag{2}$$

$$u_{\mathrm{r}}\frac{\partial T}{\partial z}=-\frac{\xi h_{\mathrm{sp}}}{\rho_{\mathrm{r}}c_{\mathrm{p}}a}(T-T_{\mathrm{w}}) \tag{3}$$

上式中：ρ为管内流体密度，kg/m^3；u为流速，m/s；下标 r 表示进口；l为倒 U 型管管长，m；t为时间，s；p为压力，Pa；Δp为倒 U 型管进出口压差，Pa；$\Delta\rho$为倒 U 型管上升段和下降段流体平均密度差，kg/m^3；g为重力加速度，m/s^2；H为倒 U 型管高度，m；f为摩擦系数，$f=0.3164Re^{-0.25}$；d_i为倒 U 型管内径，m；k为形状阻力系数；T为流体温度，K；z为流动方向坐标，m；ξ为倒 U 型管管外周周长，m；h_{sp}为一二次侧传热系数，w/m$^2\cdot$K；c_{p}为定压比热容，J/kg$\cdot$K；a为倒U型管流通面积，m^2；T_{w}为二次侧壁温，K。

Bousinessq 假设认为密度和温度之间存在如下的线性关系：

$$\rho=\rho_0\big(1-\beta(T-T_{\mathrm{w}})\big) \tag{4}$$

上式中：ρ_0表示流体在一次侧系统压力下温度为T_{w}时的密度，kg/m^3；β为热膨胀系数，K^{-1}。将上式带入(3)可得：

$$u_{\mathrm{r}}\frac{\partial\rho}{\partial z}=\frac{\xi h_{\mathrm{sp}}}{\rho_{\mathrm{r}}c_{\mathrm{p}}a}(\rho_0-\rho) \tag{5}$$

设二次侧水位为 x，定义如下无量纲参数：

$U=\frac{u}{u_0}$，$U_{\mathrm{r}}=\frac{u}{u_0}$，$\rho_{\mathrm{r}}^{+}=\frac{\rho_{\mathrm{r}}}{\rho_0}$，$\rho^{+}=\frac{\rho}{\rho_0}$，$\Delta\rho^{+}=\frac{\Delta\rho}{\Delta\rho_0}$，$\tau=\frac{tu_0}{H}$，$L=\frac{l}{H}$，$Z=\frac{z}{H}$，$\theta=\frac{T-T_{\mathrm{w}}}{T_0-T_{\mathrm{w}}}$，$\Delta p^{+}=\frac{\Delta p}{\Delta p_0}$

$$X_1=\frac{x}{H}，\ X_2=\frac{l-x}{H}=L-X_1$$

将上述表达式带入式(1)-式(3)和式(5)可得相应无量纲方程：

$$\rho^{+}U=\rho_{\mathrm{r}}^{+}U_{\mathrm{r}} \tag{6}$$

$$L\frac{\partial U_{\mathrm{r}}}{\partial\tau}=\Delta p^{+}\frac{\Delta p_0}{\rho_{\mathrm{r}}u_0^2}+\frac{\Delta\rho^{+}gH\Delta\rho_0}{\rho_{\mathrm{r}}u_0^2}-\frac{U_{\mathrm{r}}^2}{2}\left(\frac{fl}{d_i}+k\right) \tag{7}$$

$$U_{\mathrm{r}}\frac{\partial\theta}{\partial Z}=--\frac{\xi h_{\mathrm{sp}}H}{\rho_{\mathrm{r}}c_{\mathrm{p}}au_0}\theta \tag{8}$$

$$U_{\mathrm{r}}\frac{\partial\rho^{+}}{\partial Z}=\frac{\xi h_{\mathrm{sp}}H}{\rho_{\mathrm{r}}c_{\mathrm{p}}au_0}(1-\rho^{+}) \tag{9}$$

定义如下无量纲参数：

$$E_u=\frac{\Delta p_0}{\rho_{\mathrm{r}}u_0^2} \tag{10}$$

$$\Pi_{\mathrm{R}}=\frac{gH\Delta\rho_0}{\rho_{\mathrm{r}}u_0^2} \tag{11}$$

$$\Pi_{\mathrm{f}}=\frac{fl}{d_i}+k \tag{12}$$

$$\Pi_{\mathrm{h}}=\frac{\xi h_{\mathrm{sp}}H}{\rho_{\mathrm{r}}c_{\mathrm{p}}au_0} \tag{13}$$

将上述表达式带入式(7)-式(9)，可得：

$$L\frac{\partial U_r}{\partial\tau}=E_u\Delta p^{+}+\Pi_{\mathrm{R}}\Delta\rho^{+}-\Pi_{\mathrm{f}}\frac{U_{\mathrm{r}}^2}{2} \tag{14}$$

$$U_{\mathrm{r}}\frac{\partial\theta}{\partial Z}=-\Pi_{\mathrm{h}}\theta \tag{15}$$

$$U_{\mathrm{r}}\frac{\partial\rho^{+}}{\partial Z}=\Pi_{\mathrm{h}}(1-\rho^{+}) \tag{16}$$

由式(14)可得稳态时无量纲压降表达式为

$$\Delta p^{+}=\frac{\frac{\Pi_{\mathrm{f}}U_{\mathrm{r}}^2}{2}-\Pi_{\mathrm{R}}\Delta\rho^{+}}{E_u} \tag{17}$$

由式(5)可得倒 U 型管上升段无量纲平均密度：

$$\begin{aligned}\rho_u^{+}&=\frac{2}{L}\int_0^{L/2}\rho^{+}dZ=\frac{2}{L}\left(\int_0^{X_1}\rho^{+}dZ+\int_{X_1}^{L/2}\rho^{+}dZ\right)\\&=\frac{2}{L}\left[X_1+\frac{U_{\mathrm{r}}}{\Pi_{\mathrm{h}}}(1-\rho_{\mathrm{r}}^{+})\left(e^{-\Pi_{\mathrm{h}}X_1/U_{\mathrm{r}}}-1\right)+\rho^{+}(X_1)\left(\frac{L}{2}-X_1\right)\right]\end{aligned} \tag{18}$$

对于下降段$X_2\le Z\le L$，则其密度分布为

$$\rho^{+}=1-(1-\rho_{\mathrm{r}}^{+})e^{\frac{\Pi_{\mathrm{h}}}{U_{\mathrm{r}}}(X_2-X_1-Z)} \tag{19}$$

则倒 U 型管下降段无量纲平均密度为：

$$\begin{aligned}\rho_d^{+}&=\frac{2}{L}\int_{L/2}^{L}\rho^{+}dZ=\frac{2}{L}\left(\int_{L/2}^{L-X_1}\rho_1^{+}(X_1)dZ+\int_{L-X_1}^{L}\rho^{+}dZ\right)=\\&\frac{2}{L}\left[\rho_1^{+}(X_1)\left(\frac{L}{2}-X_1\right)+X_1-(1-\rho_{\mathrm{r}}^{+})\left(e^{\frac{\Pi_{\mathrm{h}}(X_2-L)}{U_{\mathrm{r}}}}-e^{\frac{\Pi_{\mathrm{h}}(X_2-X_1-L)}{U_{\mathrm{r}}}}\right)\right]\end{aligned} \tag{20}$$

由式(19)和式(20)可得

$$\Delta\rho^{+}=\rho_{d}^{+}-\rho_{u}^{+}=\frac{2}{L}(1-\rho_{\mathrm{r}}^{+})\frac{U_{\mathrm{r}}}{\Pi_{\mathrm{h}}}\left(1-e^{-\Pi_{\mathrm{h}}X_{1}/U_{\mathrm{r}}}\right)^{2} \tag{21}$$

将式(21)带入式(17)可得：

$$\Delta p^{+}=\frac{\Pi_{\mathrm{f}}U_{r}^{2}}{2E_{u}}-\frac{2\Pi_{\mathrm{R}}(1-\rho_{\mathrm{r}}^{+})U_{\mathrm{r}}\left(1-e^{-\Pi_{\mathrm{h}}X_{1}/U_{\mathrm{r}}}\right)^{2}}{E_{u}\Pi_{\mathrm{h}}L} \tag{22}$$

1.2 流动不稳定性分析

由文献[8]可知，压降和流量曲线为 N 字型，认为是一种静态流动不稳定性。基于表 1 和表 2 所示的 AP1000 倒 U 型管和蒸汽发生器参数，计算得到无量纲压降Δp^{+}与流速U_{r}之间的关系曲线如图 1 所示。当曲线位于负斜率区时，就会发生倒 U 型管内单相倒流现象。

表 1 AP1000 倒 U 型管参数

Table 1 The parameter of AP1000 inverted U-tube

项目 Name	值 Value
总传热面积 The total heat transfer area (m^2)	11477
传热管数量 The number of the heat transfer tube	10025
传热管外径 The outer diameter of the heat transfer tube, (mm)	17.48
传热管壁厚 The wall thickness of the heat transfer tube, (mm)	1.04
管间距 The pitch, (mm)	24.89
平均管长 The average tube length, (m)	22.44

表 2 AP1000 蒸汽发生器参数

Table 2 The parameter of AP1000 steam generator

项目 Name	值 Value
蒸汽发生器一次侧压力 The primary side pressure of the steam generator, (MPa)	15.5
蒸汽发生器一次侧进口温度 The primary inlet temperature of the steam generator, (K)	590
蒸汽发生器二次侧压力 The secondary side pressure of the steam generator, (MPa)	8.0
蒸汽发生器二次侧温度 The secondary side temperature of the steam generator, (K)	568.16

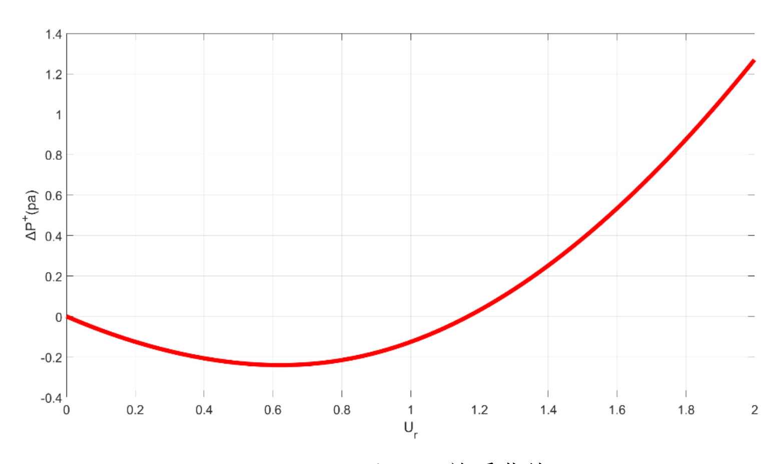


图 1 $\Delta p^{+}-U_{\mathrm{r}}$关系曲线

Fig. 1 $\Delta p^{+}-U_{\mathrm{r}}$ relation curve

倒 U 型管内单相倒流发生点即为图 1 曲线的极值点，对式(22)求$\frac{\partial \Delta p^{+}}{\partial U_{\mathrm{r}}}=0$可得临界流速$U_{\mathrm{r,c}}$：

$$U_{\mathrm{r,c}}=\frac{2\Pi_{\mathrm{R}}(1-\rho_{\mathrm{r}}^{+})\left(1-e^{-\Pi_{\mathrm{h}}X_{1}/U_{\mathrm{r}}}\right)^{2}}{\Pi_{\mathrm{f}}\Pi_{\mathrm{h}}L}-\frac{4\Pi_{\mathrm{R}}(1-\rho_{\mathrm{r}}^{+})\left(1-e^{-\Pi_{\mathrm{h}}X_{1}/U_{\mathrm{r}}}\right)\left(e^{-\Pi_{\mathrm{h}}X_{1}/U_{\mathrm{r}}}\right)}{\Pi_{\mathrm{f}}U_{\mathrm{r}}} \tag{23}$$

将式(23)代入式(22)可得临界压降Δp_{c}^{+}。

2 结果和讨论

2.1 水位对压降的影响分析

基于表 1 和表 2 所示的 AP1000 蒸汽发生器和倒 U 型管参数[8]，依据式(22)可得蒸汽发生器二次侧水位对倒 U 型管内单相流动总压降和重位压降的影响如图 2 和图 3 所示，图中水位大小关系为正常水位>水位 1>水位 2>水位 3。

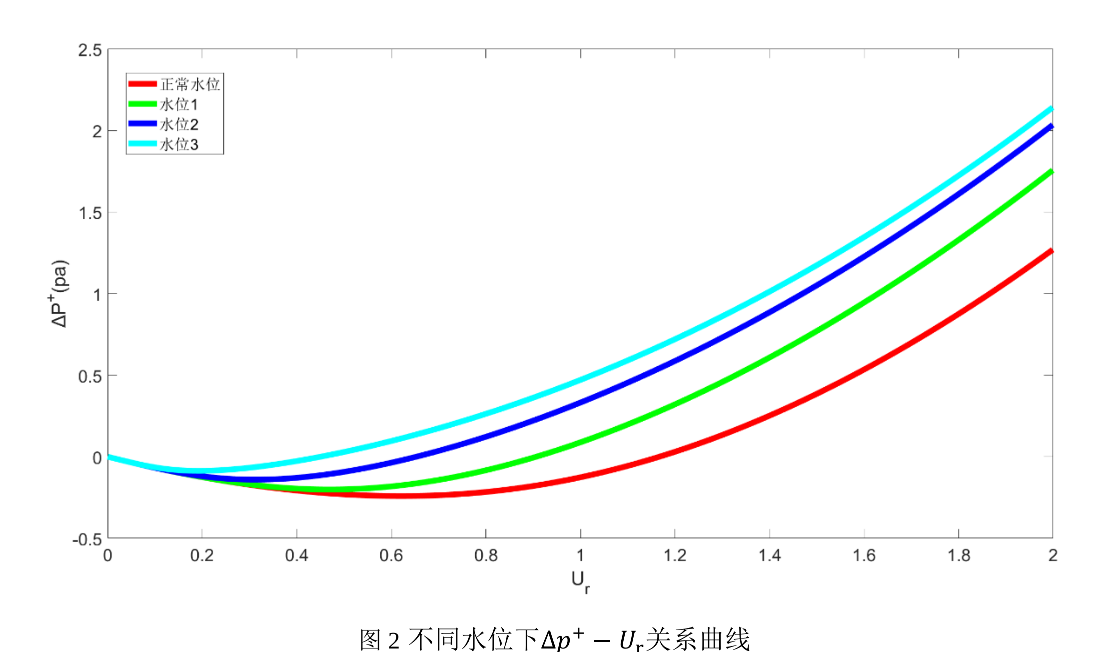


图 2 不同水位下$\Delta p^{+}-U_{\mathrm{r}}$关系曲线

Fig. 2 $\Delta p^{+}-U_{\mathrm{r}}$ relation curve under different water level conditions

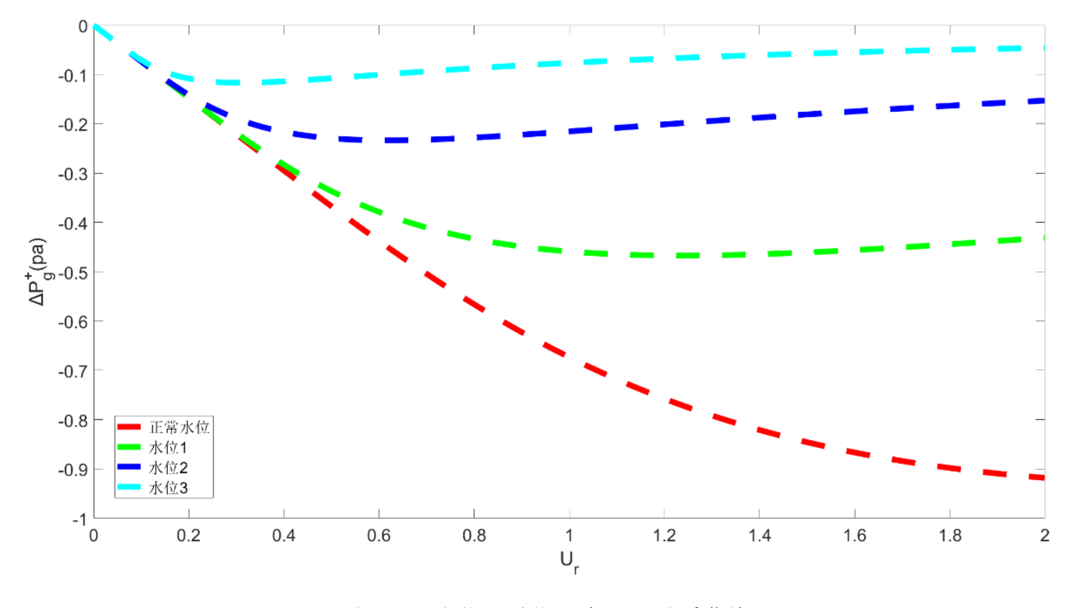


图 3 不同水位下重位压降 − U_{r}关系曲线

Fig. 3 gravitatioanl pressure drop − U_{r} relation curve under different water level conditions

结合图 2 和图 3 可知，随着倒 U 型管二次侧水位的不断降低，重位压降不断减少，$\Delta p^{+} - U_{\mathrm{r}}$关系曲线不断上移，负斜率区范围不断减少，极值点不断接近于原点。这表明随着水位的降低，单相倒流现象越不容易发生。上述现象的主要原因是二次侧水位降低造成倒 U 型管内上升段和下降段温度差异减少，进而使得上升段和下降段密度差异减少，因此重位压降的负斜率区减少。同时，总压降的负斜率区是由重位压降的负斜率区决定的，因此其负斜率区范围也不断减少。

2.2 水位对不同倒 U 型管长内倒流极值点的影响

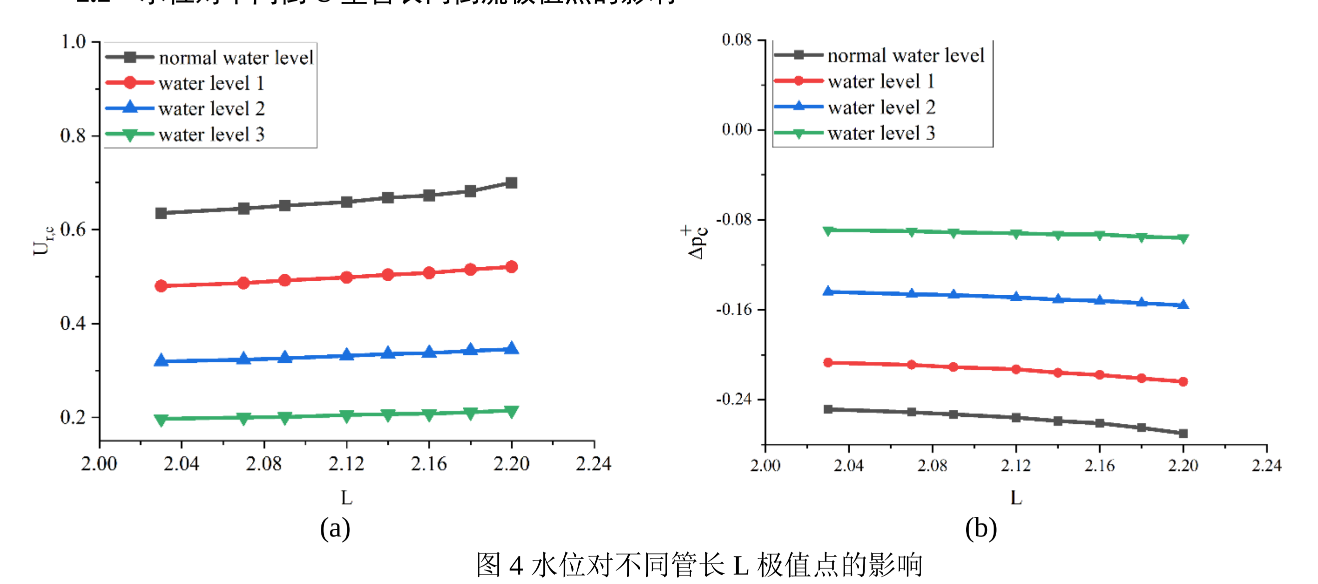


图 4 水位对不同管长 L 极值点的影响

Fig. 4 effect of water level on extreme point for different length L

不同水位条件下不同管长倒 U 型管的无量纲临界压降Δp_c^{+}和临界流速$U_{\mathrm{r,c}}$的影响如图 4 所示，图中水位关系为正常水位>水位 1>水位 2>水位 3。由图 4(a)所示，随着无量纲管长 L 的增加，无量纲临界流速$U_{\mathrm{r,c}}$逐渐增大，这表明在 AP1000 核电厂蒸汽发生器中较长倒 U 型管内更易发生倒流。随着水位的不断降低，不同管长的临界流速$U_{\mathrm{r,c}}$逐渐减少。由图 4(b)所知，无量纲临界压降Δp_c^{+}随着管长的增加不断降低，

且随着水位的不断降低而减少。图中变化趋势与上述水位对压降的影响分析相一致，原因不在赘述。

2.3 不同Π_f条件下水位对极值点的影响

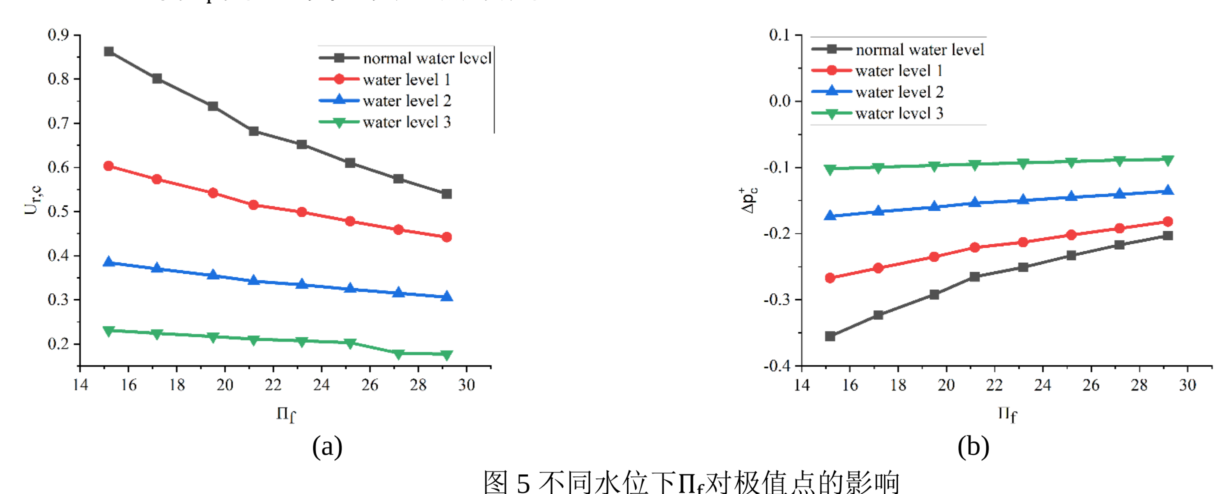


图 5 不同水位下Π_f对极值点的影响

Fig. 5 effect of Π_f on extreme point for different water level

图 5 所示为Π_f对不同水位下对极值点处Δp_c^+和$U_{r,c}$的影响。由图 5 所示，$U_{r,c}$随着Π_f的增加而减少，Δp_c^+随着Π_f的增加而增大，这表明需要更小的临界流速以达到临界压降，即倒 U 型管单相倒流随着Π_f的增加越不易发生。对比不同水位下的Δp_c^+和$U_{r,c}$的变化可知，随着蒸汽发生器二次侧水位的不断降低，Π_f的变化对两者的影响逐渐减少，即二次侧异常水位下，摩擦阻力对于倒流临界点的影响相对减小。

2.4 不同Π_h条件下水位对极值点的影响

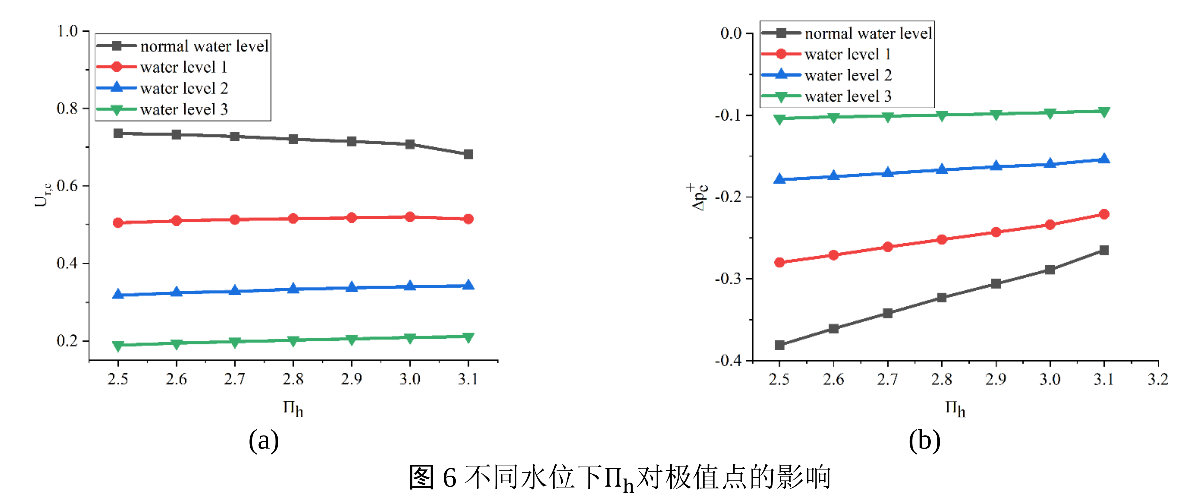


图 6 不同水位下Π_h对极值点的影响

Fig. 6 effect of Π_h on extreme point for different water level

不同水位下Π_h对极值点的影响如图 6 所示。对比图 5 和图 6 可知，Π_h相对于Π_f对于极值点的影响较小。从图 6(a)可知，不同水位下Π_h对$U_{r,c}$的影响很小，但是正常水位下和异常二次侧水位下Π_h和$U_{r,c}$的关系不同。在正常水位条件下，$U_{r,c}$随着Π_h增加略微减小，而在异常水位条件下，$U_{r,c}$随着Π_h增加略微增加。这表明异常水位下Π_h增加会导致倒流现象更易发生。进一步对比图中不同二次侧水位条件下极值点的变化发现，二次侧水位的降低导致Π_h的变化对极值点的影响越来越小。

3 结语

本文基于无量纲守恒方程采用微扰理论对蒸汽发生器二次侧不同水位条件下倒 U 型管内单相倒流行为进行了无量纲分析，分析了管长、无量纲阻力数Π_f、无量纲传热数Π_h对倒流发生处无量纲压降和流速

曲线极值点（临界压降Δp_c^+和临界流速$U_{\mathrm{r,c}}$）的影响，得到了如下结果和结论。

1) 随着二次侧水位的降低，重位压降逐渐减少，导致压降-流速曲线负斜率区范围逐渐缩小，倒流发生时的无量纲极值点逐渐接近于 0，表明倒流越不易发生。
2) 在本文分析的管长范围内（$2.0 \le L \le 2.2$），管长对Δp_c^+和$U_{\mathrm{r,c}}$的影响较小。随着管长的增大，Δp_c^+逐渐减小，$U_{\mathrm{r,c}}$逐渐增大，表明较长倒 U 型管更易发生倒流。随着二次侧水位的减小，管长的影响逐渐减小。
3) 在本文分析的Π_{f}范围内（$15.0 \le \Pi_{\mathrm{f}} \le 30.0$），随着$\Pi_{\mathrm{f}}$的增加，$\Delta p_c^+$逐渐增大，$U_{\mathrm{r,c}}$逐渐减小，表明倒流更不易发生，且随着二次侧水位的减小，Π_{f}的影响逐渐减小。
4) 在本文分析的Π_{h}范围内（$15.0 \le \Pi_{\mathrm{f}} \le 30.0$），随着$\Pi_{\mathrm{h}}$的增加，在水位正常条件下，$\Delta p_c^+$逐渐增大，$U_{\mathrm{r,c}}$逐渐减小，表明倒流更不易发生，而在低水位条件下，$\Delta p_c^+$和$U_{\mathrm{r,c}}$逐渐增大，表明倒流更易发生。

作者贡献声明 沈梦思完成主要研究工作及论文撰写，赵鹏程负责论文的修订，李卫负责对论文内容提供知识指导，刘紫静负责指导研究工作方法、完善研究方案。

参考文献

1 Loomis G G, Soda K. Results of semi-scale MOD-2A natural circulation experiments [R]. NRC, NUREG/CR-2335EGG-2200, 1982.

2 Sanders J. Stability of single-phase natural circulation with inverted U-tube steam generators [J]. Journal of Heat Transfer，1988，110：735-742.

3 Watanabe T, Anoda Y, Takano M. Stability of single-phase natural-circulation flows in steam generator U tubes[J]. Annals of Nuclear Energy, 2013, 60(Oct.): 344-349.DOI:10.1016/j.anucene.2013.05.026.

4 章德, 陈文振, 王少明. 管长对立式倒 U 型管蒸汽发生器流动不稳定性的影响分析[J]. 原子能科学技术, 2011, 45(6): 667-671.

ZHANG De, CHEN Wen-zhen, WANG Shao-ming. Influence of U-Tube Length on Flow Instability of Vertically Inverted U-Tube Steam Generator[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2011, 45(6): 667-671.

5 郝建立，陈文振，王少明. 自然循环蒸汽发生器倒 U 型管内倒流特性的无量纲分析[J]. 原子能科学技术，2012，46(s)：246-249.

HAO Jian-li, CHEN Wen-zhen, WANG Shao-ming. Dimensionless Analysis of Reverse Flow in Inverted U-tubes of Steam Generator Under Natural Circulation[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2012，46(s)：246-249.

6 郝建立，陈文振，杨磊，王少明. 自然循环蒸汽发生器倒 U 型管内流动不稳定性判断准则[J]. 计算物理，2013，30（4）：515-519.

Haojianli, Chen Wenzhen, Yang Lei, et al. Criteria of Flow Instabilities in Steam Generator U-Tubes with Natural Circulation[J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2013, 30(4): 515-519.

7 Hao J, Chen W, Zhang D, et al. Scaling modeling analysis of flow instability in U-tubes of steam generator under natural circulation[J]. Annals of Nuclear Energy, 2014, 64(Feb.): 169-175. DOI: 10.1016/j.anucene.2013.10.001.

8 Shen M , Yu L , Lin M ,et al.Investigation on reverse flow phenomenon in UTSGs with abnormal secondary side water level under single-phase natural circulation[J].Progress in Nuclear Energy, 2019, 119:103180.DOI:10.1016/j.pnucene.2019.103180.

9 Li M, Chen W, Hao J, et al. Investigation on reverse flow characteristics in UTSGs with coupled heat transfer between primary and secondary sides[J]. Annals of Nuclear Energy, 137[2024-04-25]. DOI: 10. 1016/j. anucene. 2019. 107064.

10 王一浒，卢 川，丛腾龙，等. 自然循环 U 型管蒸汽发生器管内倒流受管长影响的理论研究[J]. 核动力工程，2021,42（1）：23-27.

Wang Yihu, Lu Chuan, Cong Tenglong, et al. Theory Study on Effect of U-Tube Length on Reverse Flow in UTSG[J]. Nuclear Power Engineering, 2021,42(1)：23-27.